费米耀变体峰值参量、康普顿主导、谱指数之间相关性的研究

彭瑞[1]，谢照华[1]，薛瑞[2]，王泽睿[2]，罗丹[1]，黄红艳[1]，徐云冰[1]，刘文广[1]，易庭丰[1]，谭灿[1]，刘小鹏[1]，杜雷鸣[1]

(1.云南师范大学 物理与电子信息学院，云南 昆明 650500; 2.南京大学 天文与空间科学学院，江苏 南京 210093)

摘 要：使用了一个具有（准）同时性宽带能谱数据的Fermi耀变体样本，对其进行了同步和逆康普顿峰峰值参量、康普顿主导以及高能谱指数等参量之间的相关性分析。以获得耀变体整体和子类相关性之间差异来源、耀变体喷流中粒子冷却的主导机制，和电子能谱形状等方面的解释。分析结果表明耀变体的整体相关性至少有部分来自于平谱射电类星体和BL Lac天体由于物理性质不同而在参数平面上具有不同分布区域这一特性贡献，因此针对两个子类的相关性分析是必需的。BL Lac天体为快冷却机制。谱指数图的结果支持对数抛物线形状的电子能谱。

关键词：星系； 活动星系； 辐射机制； 非热

中图分类号：P157 **文献标识码：**A **文章编号：**1007-2276-(2004)4-0338-05

1 引 言

在耀变体观测数据相关性的研究中，有一个值得注意的现象是，对于整个样本，单独的平谱射电类星体(FSRQ)和单独的蝎虎天体(BL Lac)样本，同步峰峰值频率(ν_{peak}^{syn})和同步峰峰值光度($\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$)之间相关性是不同的[1-2]。而且在若干耀变体的相关性分析中都存在类似的差异性。如，文[1]发现康普顿主导(Compton Dominance, CD, IC 峰峰值光度与同步峰峰值光度之比)和ν_{peak}^{syn}之间的反相关性存在于整个样本和 BL Lac 中，但是不存在于 FSRQ 中。文[2]研究了一个包含 1425 个费米耀变体的样本。他们发现ν_{peak}^{syn}和α_{OX}，ν_{peak}^{syn}和L_{γ}，ν_{peak}^{syn}和L_R,之间的反相关性存在于整个样本和单独的 BL Lac 中，但是并不存在于 FSRQ 中。文 [3]发现 CD 和ν_{peak}^{syn}之间的反相关性存在于整个样本和单独的 BL Lac 中，但是并不存在于 FSRQ 中。由于一般会把耀变体当作一个具有连续内在物理性质的整体，所以耀变体整体和子类相关性之间的差异来源值得研究。

另一个方面，在通用的单区轻子模型中，对于一定形状的注入电子能谱，由于冷却将会导致另一个形状不同的冷却后电子能谱。根据标准的激波加速机制，冷却可以分为快冷却和慢冷却两种。关于耀变体的冷却，有不同的看法。文 [4]指出高功率的 FSRQ 和 BL Lac 分别位于快冷却和慢冷却区。文[5]在伽马暴和耀变体同步辐射的对比中，得到耀变体整体属于慢冷却。文[6]的工作则得到耀变体整体处于快冷却区。所以来自一个同时性较大样本的统计分析对于这个问题是有意义的。

第三方面，观测和理论都指出，耀变体的伽马谱指数和 IC 峰峰频之间存在一个线性关系，这个关系被称为“谱指数图”。文[7]使用一个对数抛物线能谱的能均分轻子模型对此进行了解释。这个模型也需要一个同时性的较大样本来进行检验。

---

*基金项目：天文学联合研究基金(U1431123)；国家自然科学基金(11463001)；云南省自然科学基金(2013FZ042，2017FD072)；云南省教育厅项目(2014Y138)资助.

收稿日期：2019- ； 修订日期：2019-

作者简介：彭瑞，男，硕士. 研究方向：理论物理. Email:996119869@qq.com

通讯作者：杜雷鸣，男，副教授. 研究方向：理论物理和天体物理. Email:173998058@qq.com

① https://tools.ssdc.asi.it/

2 样本

由于耀变体具有快速光变等特点[8-9]，为了有效降低峰值频率在估计时不确定的误差[10]，我们需要一个同时或至少准同时性数据的大样本，并且 SED 的全波段能够很好的拟合。在文[11]中，他们收集了 279 个耀变体，其中包括 200 个 FSRQ 和 79 个 BL Lac。本文的工作将基于他们的样本做进一步的研究。

在我们的工作中，来自文[11]样本的三个子样本将在下一节进行具体研究。子样本 A 中包含了 274 个可以被拟合出同步峰的耀变体，用于研究同步峰峰值频率(ν_{peak}^{syn})和同步峰峰值光度($\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$)之间的相关性。子样本 B 中包含了 143 个可以被拟合出 IC 峰的耀变体，用于研究 IC 峰峰值频率(ν_{peak}^{IC})分别和 IC 峰峰值光度($\nu L_{peak}^{IC}(\nu)$)、伽马谱指数(Γ_γ)之间的相关性。子样本 C 中包含了 109 个可以被拟合出完整 SEDs 的耀变体，用于研究ν_{peak}^{syn}分别和热光度(L_{bol})、康普顿主导(CD)之间的相关性。此外，在子样本 A、B 和 C 中，我们分别对整个样本(FSRQ 和 BL Lac)、单独的 FSRQ 和单独的 BL Lac，进行了五组相关性分析的研究。

3 相关性分析和结果

文[11]使用二次函数：

$$\log(\nu F_\nu) = c(\log\nu)^2 + b(\log\nu) + a \tag{1}$$

分别拟合同步峰和 IC 峰。因此可以推导得出峰值光度、峰值频率和康普顿主导。热光度可以通过计算得到：

$$L_{bol} = 4\pi D_L^2 F_{integrated} \tag{2}$$

其中D_L是光度距离，$F_{integrated}$是热流量积分。

在子样本 A、B 和 C 中，我们分别对整个样本、FSRQ 和 BL Lac，检验了$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$、$\log\nu_{peak}^{IC}$和$\log\nu L_{peak}^{IC}(\nu)$、$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log L_{bol}$、$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$、和$\Gamma_\gamma$和$\log\nu_{peak}^{IC}$之间的皮尔逊相关性。分析结果如表一所示，相关关系如图一所示。

分析结果表明，对于整个样本，所有的五组关系都存在显著的反相关性。在子样本 B 中，对于单独的 FSRQ 和 BL Lac，Γ_γ和$\log\nu_{peak}^{IC}$之间存在显著的反相关性。在子样本 C 中，对于单独的 BL Lac，$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间存在显著的反相关性。值得考虑的是，在相关性分析中，样本数据存在一定的弥散度，这可能对分析结果有一定的影响。

4 讨论和结论

4.1 耀变体总体和各子类之间相关性差异的来源分析

从图一(a)(b)(c)(d)中可以明显看到。FSRQ 和 BL Lac 的数据点在参数平面上的分布是不同的。相比之下，大多数 FSRQ 位于参数平面的左上角。然而，BL Lac 分布在各个部分，从左上到右下角。在图一(e)中，FSRQ 和 BL Lac 的数据点在参数平面的分布类似，从左上到右下角。

为了更清晰的刻画两个子类分布的不同，我们分别计算了 FSRQ 和 BL Lac 这两个子类的样本数据点纵横坐标在参数平面上的算术平均位置 (该位置后面简称“质心位置”或“质心”)。两个质心如图一所示，很明显可以看到，FSRQ 和 BL Lac 的质心位置是完全不同的。相比之下，FSRQ 的质心位于参数平面的左上角，而 BL Lac 的质心位于右下角，并且两个质心之间存在明显的距离。

在所有五组相关分析中，都存在两个质心分开的情况。为了研究质心分开对整个样本相关性的影响，我们做了一个数值模拟。

参数平面上，我们设FSRQ的质心是C.F点，BL Lac的质心是C.B点。首先，我们将BL Lac的所有数据点不动，把FSRQ数据点从原来的位置整体做平移，使得移动的FSRQ的质心位置(移动数据点的质心F')与C.B点重合。然后从C.B点出发，使得FSRQ的全部数据点，沿着C.F点与C.B点的连线做平移。在此过程，计算出由BL Lacs和F'数据点组成的整个样本的相关显著性参数(即皮尔逊相关系数r，p值)。分析结果如图二所示，图中空心圆和实心圆分别表示FSRQ的起点和质心对应的位置。我们可以发现，随着BL Lac和F'数据点距离的增大，无论两者的子样本是否存在相关性，BL Lac和F'数据点组成的整个样本的反相关性都变得更加显著。由于FSRQ和BL Lac两个子类在参数平面上的位置，正好位于图中模拟的这样一个线性相关的显著性逐渐增强的过程中，所以在以上五组整个样本的相关性分析中，我们不能排除FSRQ和BL Lac质心的分开而带来的贡献。对文[2]和[3]的分析，也给出类似的结果。

耀变体的统一方案要求，沿着 HBL-IBL-LBL-FSRQ 的耀变体序列存在内在的、物理的、连续的演化趋势。因此，我们可以预期这种趋势自然地分别存在于 FSRQ 和 BL Lac 中，并进一步存在于耀变体中。然而，在本文中的五组相关性，这种预期并不完全成立。首先，对于$\log \nu_{peak}^{syn}$和$\log \nu L_{peak}^{syn}(\nu)$、$\log \nu_{peak}^{IC}$和$\log \nu L_{peak}^{IC}(\nu)$、$\log \nu_{peak}^{syn}$和$\log L_{bol}$之间相关性，FSRQ 和 BL Lac 都不存在明显的趋势。但是，对于整个样本却存在明显的趋势。其次， $\log \nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间显著的相关性不存在于单独的 FSRQ 中，但是对于整个样本和单独的 BL Lac，又存在这样的趋势。这两种情况下，线性相关的显著性中不能排除 FSRQ 和 BL Lac 之间质心分开产生的贡献。最后，Γ_γ和$\log \nu_{peak}^{IC}$之间的关系，从 4.3 节结果可知，FSRQ 和 BL Lac 由于不同的辐射机制而导致不同的斜率。简单的把两个子类合成一个整体，会导致整个样本中得到非物理的相关性。

综上，我们认为，至少在某些情况下，把耀变体的两个子类作为一个整体来研究耀变体的统计趋势时，将会导致一个虚假的相关性或者非物理的结果。所以，对于耀变体的相关性研究应该对两个子类分别进行。

4.2 耀变体主导冷却机制的研究

分析结果表明，对于 BL Lac，$\log \nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间存在显著的反相关性。我们将对这组相关性进行如下讨论。对于均匀、单区的轻子模型[1]， CD 可以写成：

$$CD \equiv \frac{\max[L_{peak}^{EC}, L_{peak}^{SSC}]}{L_{peak}^{syn}} \approx \frac{\max[\delta^2 u_{ext}, u'_{syn,peak}]}{u'_B} \tag{3}$$

其中L_{peak}^{EC}是 EC 过程的峰值光度，L_{peak}^{SSC}是 SSC 过程的峰值光度，L_{peak}^{syn}是同步峰峰值光度，δ是多普勒因子，$u'_B = \frac{B^2}{8\pi}$是辐射区的磁场能量密度，$u'_{syn,peak}$是同步峰峰值能量密度，u_{ext}是外光子场的能量密度。“$'$” 表示 blob (辐射区的几何形状为球形)在共动参考系下的参量。

对于 BL Lac，高能辐射通常是由 SSC 过程主导[11-13]。因此，CD 可以改写成：

$$CD = \frac{L_{peak}^{SSC}}{L_{peak}^{syn}} = \frac{u'_{syn,peak}}{u'_B} \tag{4}$$

同步峰峰值能量密度可以写成[1]：

$$u'_{syn,peak} = \frac{u'_B \sigma_T}{2\pi R_b'^2} Q_0 t_{esc} \begin{cases} \gamma_c^{3-q} & \gamma_1 < \gamma_c \\ \gamma_c \gamma_1^{2-q} & \gamma_c < \gamma_1 \end{cases} \tag{5}$$

其中R'_b是 blob 的半径，γ_c是冷却电子的洛伦兹因子，γ_1是电子洛伦兹因子的最小值，σ_T是汤姆逊散射截面， q是注入电子光谱指数，$t_{esc} = \frac{\eta R'_b}{c}$是逃逸时间，c 是光速。

然后，方程(4)可以写成：

$$CD = \frac{u'_{syn,peak}}{u'_B} = \frac{\sigma_T}{2\pi R_b'^2} Q_0 \frac{\eta R'_b}{c} \begin{cases} \gamma_c^{3-q} & \gamma_1 < \gamma_c \\ \gamma_c \gamma_1^{2-q} & \gamma_c < \gamma_1 \end{cases} \tag{6}$$

此外，同步峰峰值频率的理论模型[13-14]：$\nu_{peak}^{syn} \propto \gamma_b^2 B\delta$ (7)

其中γ_b是电子能谱分布(electron energy distribution)转折处的洛伦兹因子，B 是磁场强度。

因此，CD 和ν_{peak}^{syn}之间的相关性可以转换为 CD 和γ_b^2之间的相关性。

假如注入电子具有单幂律能谱，即[15-19]: $Q_e(\gamma) = Q_0\gamma^{-q}H(\gamma;\gamma_1,\gamma_2)$ (8)

其中 H 是亥维赛函数。

冷却（包含同步冷却和逆康普顿冷却）之后的稳态电子能谱可以用拐折幂律谱描述，

$$N(\gamma) = \begin{cases} K_1\gamma^{-q_1} & \gamma_1 < \gamma < \gamma_b \\ K_2\gamma^{-q_2} & \gamma_b < \gamma < \gamma_2 \end{cases} \tag{9}$$

其中$K_2 = K_1{\gamma_b}^{q_2-q_1}$，$q_1, q_2$分别是同步峰左右两侧光薄段的谱指数，$\gamma_1$是电子的洛伦兹因子的最小值，$\gamma_2$是其最大值。

γ_c是冷却电子的洛伦兹因子[1]

$$\gamma_c = \frac{3m_ec^2}{4c\sigma_T(u'_B+u'_{syn,tot}+\Gamma^2u_{ext})t_{esc}} \tag{10}$$

其中$u'_{syn,tot}$是同步峰总能量密度。

$\gamma_c > \gamma_1$的情况对应慢冷却，此时，$\gamma_b = \gamma_c$，电子能谱可以近似为：

$$N_e(\gamma) \approx Q_0t_{esc}\gamma_c^{-q}\begin{cases} (\gamma/\gamma_c)^{-q} & \gamma_1 < \gamma < \gamma_c \\ (\gamma/\gamma_c)^{-q-1} & \gamma_c < \gamma < \gamma_2 \end{cases} \tag{11}$$

而$\gamma_c < \gamma_1$的情况对应快冷却，此时，$\gamma_b = \gamma_1$，电子能谱为

$$N_e(\gamma) \approx Q_0t_{esc}\gamma_c\gamma_1^{-(q+1)}\begin{cases} (\gamma/\gamma_1)^{-2} & \gamma_c < \gamma < 1 \\ (\gamma/\gamma_1)^{-q-1} & \gamma_1 < \gamma < \gamma_2 \end{cases} \tag{12}$$

文[20-23]发现δ和ν_{peak}^{syn}的之间存在反相关关系，这个关系可以具体求出来。根据文[24-25]，分别可知$M_{BH}{\sim}\delta^{1.5}$，$\nu_{peak}^{syn}{\sim}M_{BH}^{-1.67}$ 。因此，就有$\delta{\sim}{\nu_{peak}^{syn}}^{-0.40}$ 。

快冷却机制下，根据方程(7)，CD 可以写成：

$$CD = \frac{\sigma_T\eta Q_0\gamma_c}{2\pi cR'_b}\left(\frac{1}{B\delta}\right)^{1-\frac{q}{2}}\left(\nu_{peak}^{syn}\right)^{1-\frac{q}{2}} \tag{13}$$

假设除δ和ν_{peak}^{syn}外，其他量只贡献离散，那么该结果可以表示为：

$$log\,CD = \left(1-\frac{q}{2}\right)log\,\nu_{peak}^{syn} + \left(\frac{q}{2}-1\right)\log\delta \tag{14}$$

有，

$$log\,CD = 1.4\left(1-\frac{q}{2}\right)log\,\nu_{peak}^{syn} \tag{15}$$

慢冷却机制下，

$$CD = \frac{\sigma_T\eta Q_0}{2\pi cR'_b}\left(\frac{1}{B\delta}\right)^{\frac{3-q}{2}}\left(\nu_{peak}^{syn}\right)^{\frac{3-q}{2}} \tag{16}$$

类似快冷却的处理，

$$log\,CD = 1.4\left(\frac{3-q}{2}\right)log\,\nu_{peak}^{syn} \tag{17}$$

由方程(15)和(17)知，$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间存在线性关系，快冷却斜率为$1.4\left(1-\frac{q}{2}\right)$，慢冷却斜率为$1.4\left(\frac{3-q}{2}\right)$。

对 BL Lac 有一个显著的反相关关系: $\log CD = (-0.54 \pm 0.09)\log\nu_{peak}^{syn} + (3.80 \pm 1.12)$，$(p = 0.002, r = -0.559)$。假设 BL Lac 是快冷却机制，根据方程（15）将得到 q=2.78；假设 BL Lac 是慢冷却机制，根据方程（17）将得到 q=3.78。考虑到模型研究结果表明 q 的范围是 2~3，例如：文[26-27]给出 q~2；文[1]给出 q=2.5；文[15]给出 q=2.6；文[16]给出 q=3；文[17]给出 2.4>q>3；文[19]给出 2.2>q>2.3； 文[18]给出 q~3。所以取 q=2.78 合理。但是因为该反相关具有一定的弥散，所以这个关系只能解释为 BL Lac 的主导冷却机制为快冷却。指出的是，与文[1]图 5 中 BL Lac 样本相比，本文样本中高同步峰峰值频率的源较少，也有可能会对分析结果有一定影响。

对于 FSRQ，高能辐射通常是由 EC 过程主导[1,12-13]。然后，根据方程(3)，CD 可以得到: $CD_{EC} = \frac{\delta_D^2u_{ext}}{u'_B}$，其中$u_{ext} \propto B^4$[1]。因此，CD 可以改写成：

$$CD_{EC} \propto \delta_D^2 \cdot B^2 \tag{18}$$

考虑到 B 和δ_D只在相关关系中贡献离散，结合（7）式，那么$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间就不存

在相关性。这和前述相关分析的结果是一致的。

而如果把耀变体当作一个整体进行相关性分析，根据表 1 的结果将得到 q=3.66 (对应快冷却)或者 q=4.66 (对应慢冷却)，q 的值都与目前研究结果范围有较大出入。所以这表明把耀变体当作一个整体进行分析时，有可能会导致一些非物理的结果。而按子类分别分析则可以避免这样的情况。

4.3 耀变体的谱指数图

我们的分析结果显示，对于整个样本，单独的 FSRQ 和单独的 BL Lac，Γ_γ和$\log\nu_{peak}^{IC}$之间存在显著的反相关性。这与前人的研究结果一致[7,28-30]。

根据均匀的对数抛物线的电子能谱模型，考虑到不同的康普顿散射机制。文[7]得到Γ_γ和$\log\nu_{peak}^{IC}$之间的关系：形如$\Gamma_\gamma = \mathrm{d} - \mathrm{k}\log\nu_{peak}^{IC}$。对于 EC 过程，$\mathrm{k} = \frac{b}{2}$；对于 SSC 过程，$\mathrm{k} = \frac{b}{4}$，这里 b 是对数抛物线电子能谱的宽度。本文的结果对于 FSRQ 和 BL Lac，k 的值分别为$k_F = -0.34 \pm 0.02$，$k_B = -0.19 \pm 0.02$。在 1σ的范围内有$k_F = 2k_B$。此结果与文 [7]一致，并为对数抛物线电子能谱模型提供了观测上的支持。

值得注意的是，如果把耀变体看作一个整体，对应的线性回归斜率为$\mathrm{k} = -0.29 \pm 0.02$，无法从物理上解释这个斜率。但是容易看出这个斜率来自于两个子类质心分开的贡献。这也再次表明，当 FSRQ 和 BL Lac 在物理机制上存在不同时，简单的将它们当作一个整体并进行相关性分析可能会导致一个非物理的结果。

4.4 结论

在我们的工作中，我们研究了来自费米二期的 279 个耀变体的准同时性数据，其中包括 200 个 FSRQ 和 79 个 BL Lac。分析结果表明，$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$之间显著的反相关性存在于整个样本中，不存在于单独的 FSRQ 和单独的 BL Lac 中。Γ_γ和$\log\nu_{peak}^{IC}$之间显著的反相关性存在于整个样本，单独的 FSRQ 和单独的 BL Lac 中。$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log L_{bol}$之间显著的反相关性存在于整个样本中，不存在于单独的 FSRQ 和单独的 BL Lac 中。$\log\nu_{peak}^{syn}$和$\log CD$之间显著的反相关性存在于整个样本和单独的 BL Lac 中，不存在于单独的 FSRQ 中。

数值模拟的结果表明，在整个样本的相关性中，FSRQ 和 BL Lac 质心的分离对于整个样本相关性的显著性有贡献，这有可能导致一个虚假的相关性。因此，至少在某些情况下，把耀变体的两个子类作为一个整体来研究耀变体的统计趋势时，将会导致一个虚假的相关性或者非物理的结果。

通过相关性分析，我们认为，BL Lacs 的辐射区的电子冷区机制对应快速冷却机制。

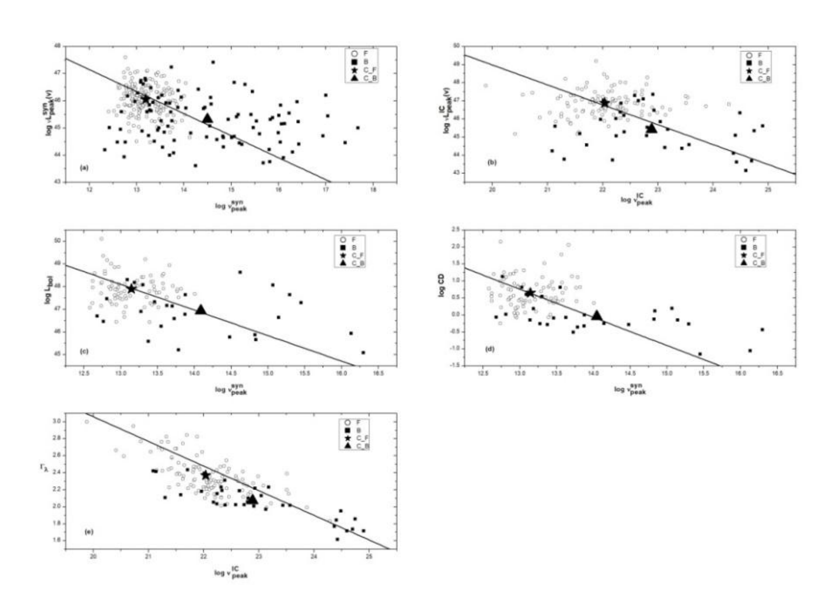
分析结果支持光谱指数图。为对数抛物线的电子能谱模型提供了观测上的支持。

表一 线性回归分析结果

Table 1 The linear regression analysis results

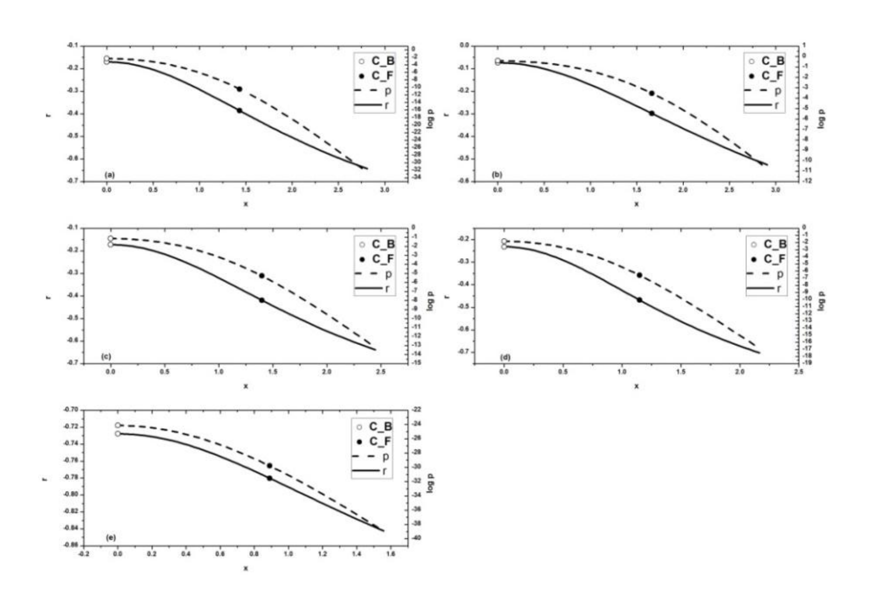
关系	样本	a	Δa	b	Δb	N	p	r
$\log\nu_{peak}^{syn}$ VS $\log\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$	sub-sample A	-0.81	0.05	56.87	0.71	274	6.3×10^{-12}	-0.4
	FSRQs	-1.13	0.13	60.92	1.76	179	0.07	-0.137
	BL Lacs	-0.86	0.10	57.72	1.47	95	0.058	-0.195
$\log\nu_{peak}^{IC}$ VS $\log\nu L_{peak}^{IC}(\nu)$	sub-sample B	-1.10	0.11	7.094	2.53	143	2.6×10^{-4}	-0.301
	FSRQs	1.00	0.13	24.80	2.97	107	0.547	0.059
	BL Lacs	-1.04	0.23	69.11	5.16	36	0.173	-0.232
Γ_γ VS $\log\nu_{peak}^{IC}$	sub-sample B	-0.29	0.02	8.86	0.36	143	$<1.0\times10^{-14}$	-0.78
	FSRQs	-0.34	0.02	9.82	0.55	107	$<1.0\times10^{-17}$	-0.704
	BL Lacs	-0.19	0.02	6.49	0.41	36	6.3×10^{-11}	-0.849
$\log\nu_{peak}^{syn}$ VS $\log CD$	sub-sample C	-0.83	0.08	11.55	1.07	109	3.1×10^{-7}	-0.465
	FSRQs	1.04	0.18	-13.07	2.41	81	0.511	-0.074
	BL Lacs	-0.54	0.08	3.80	1.12	28	0.002	-0.559
$\log\nu_{peak}^{syn}$ VS $\log L_{bol}$	sub-sample C	-1.13	0.12	62.79	1.64	109	1.1×10^{-5}	-0.405
	FSRQs	-1.12	0.24	62.67	3.11	81	0.442	-0.086

	BL Lacs	-0.99	0.24	60.89	3.36	28	0.214	-0.242



图一 (a) $\log\nu_{peak}^{syn}$与$\log\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$的相关性分析；(b) $\log\nu_{peak}^{IC}$与$\log\nu L_{peak}^{IC}(\nu)$的相关性分析；(c) $\log\nu_{peak}^{syn}$与$\log L_{bol}$的相关性分析；(d) $\log\nu_{peak}^{syn}$与$\log CD$的相关性分析；(e) Γ_{γ}与$\log\nu_{peak}^{IC}$的相关性分析。FSRQ:黑色空心圆；BL Lac：黑色实心正方形；FSRQ的质心：黑色实心五角星；BL Lac的质心：黑色实习三角形；实线是最佳线性拟合。

Fig 1. The correlations between (a) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log\nu L_{\rm peak}^{\rm syn}(\nu)$; (b) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm IC}$ and $\log\nu L_{\rm peak}^{\rm IC}(\nu)$; (c) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log L_{\rm bol}$; (d) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log$ CD; (e) Γ_{γ} and $\log\nu_{\rm peak}^{\rm IC}$. FSRQ: black empty circles; BL Lac: black filled squares. The centroid of FSRQ: black filled star; The centroid of BL Lac: black filled triangle. The solid line is the best fitting line equation for the whole sample.



图二 整个样本(a) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$与$\log\nu L_{peak}^{syn}(\nu)$的相关性数值模拟分析；(b) $\log\nu_{peak}^{IC}$与$\log\nu L_{peak}^{IC}(\nu)$的相关性数值模拟分析；(c) $\log\nu_{peak}^{syn}$与$\log L_{bol}$的相关性数值模拟分析；(d) $\log\nu_{peak}^{syn}$与$\log CD$的相关性数值模拟分析；(e) Γ_{γ}与$\log\nu_{peak}^{IC}$的相关性数值模拟分析。"p"是p值；"r"是皮尔逊相关系数；"x"是F' 与BL Lac的质心之间的距离。虚线表示"p"值与"x"的函数；实线表示"r"与"x"的函数。*C-B*表示两个质心相互重合时，数据点的集合的显著性；*C-F*表示整个样本的显著性。

Fig 2. The simulations of the correlation for the whole sample between (a) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log\nu L_{\rm peak}^{\rm syn}(\nu)$; (b) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm IC}$ and $\log\nu L_{\rm peak}^{\rm IC}(\nu)$; (c) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log L_{\rm bol}$; (d) $\log\nu_{\rm peak}^{\rm syn}$ and $\log{\rm CD}$; (e) Γ_γ and $\log\nu_{\rm peak}^{\rm IC}$. The '*p*' is the p-value; '*r*' is the Pearson correlation coefficient; '*x*' is the distance between centroids of F' and BL Lac. The dashed curve denotes the p-value as a function of *x* and the solid curve denotes the *r* as a function of *x*. *C-B* represents the significance of the dataset where the two centroids conincides with each other, and *C-F* represents the significance of the whole sample.

参考文献:

[1] Finke J D . COMPTON DOMINANCE AND THE BLAZAR SEQUENCE[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 763(2).

[2] Fan J H , Yang J H , Liu Y , et al. The Spectral Energy Distributions of Fermi Blazars[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2016.

[3] Fan XL(范绪亮), Bai JM(白金明), Mao JR(毛基荣). What determines the observational differences of blazars?[J]. 天文和天体物理学研究：英文版, 2016, 16(11):61-70.

[4] Ghisellini G. Extreme blazars[J]. Astroparticle Physics, 1999, 48(5):375-380.

[5] Lyu F , Liang E W , Liang Y F , et al. DISTRIBUTIONS OF GAMMA-RAY BURSTS AND BLAZARS IN THE L-p-E-p-PLANE AND POSSIBLE IMPLICATIONS FOR THEIR RADIATION PHYSICS[J]. ASTROPHYSICAL JOURNAL, 2014, 793(1).

[6] Yan D , Zhang L , Zhang S N . Formation of very hard electron and gamma-ray spectra of flat spectrum radio quasar in fast-cooling regime[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 459(3):423-426.

[7] Dermer C. D., Yan D., Zhang L ,et al. NEAR-EQUIPARTITION JETS WITH LOG-PARABOLA ELECTRON ENERGY DISTRIBUTION AND THE BLAZAR SPECTRAL-INDEX DIAGRAMS[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 809(2):174.

[8] 余莲，张雄，张皓晶，李富婷，徐小林，任国伟，吴月承. 类星体长周期光变分析方法的研究[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(2):

[9] 任国伟，张雄，张皓晶，李富婷，徐小林，余莲，吴月承，晏培琳. Fermi 耀变体的辐射特性和演化研究[J]. 天文研究与技术, 2019, 16(3

[10] Ding N , Zhang X , Xiong DR(熊定荣), et al. The physical properties of Fermi TeV BL Lac objects' jets[J]. 2017.

[11] Xue R , Luo D , Du L M , et al. Curvature of the spectral energy distribution, the inverse Compton component and the jet in Fermi 2LAC blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 463.

[12] Nalewajko K , Gupta M . The sequence of Compton dominance in blazars based on data from WISE and\r, Fermi\r, -LAT[J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 606:A44.

[13] Ghisellini G , Tavecchio F., Foschini L ,et al. General physical properties of bright Fermi blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 402(1):497-518.

[14] Boula S , Kazanas D , Mastichiadis A . Accretion Disk MHD Winds and Blazar Classification[J]. 2018.

[15] Rueda-Becerril J M , Mimica P , Aloy M A . The influence of the magnetic field on the spectral properties of blazars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 438(2):1856-1869.

[16] Dermer C D . The Extragalactic γ Ray Background[C]// American Institute of Physics, 2007.

[17] Boettcher M , Reimer A . Modeling the Multiwavelength Spectra and Variability of BL Lacertae in 2000[J]. Astrophysical Journal, 2004, 609(2):pάgs. 576-588.

[18] Yang J , Wang J . Mechanism of very high energy radiation in BL Lacertae object 3C 66A[J]. Astronomy & Astrophysics, 2009, 511(1):197-277.

[19] Achterberg A , Gallant Y A , Kirk J G , et al. Particle acceleration by ultrarelativistic shocks: theory and simulations[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, 328(2):393-408.

[20] Nieppola E , Tornikoski M , Kotiranta M , et al. Blazar sequence - an artefact of Doppler boosting[J]. Astronomy & Astrophysics, 2009, 488(3):867-872.

[21] Wu Z , Jiang D R , Gu M , et al. VLBI observations of seven BL Lacertae objects, from RGB sample[J]. Astronomy and Astrophysics, 2007, 466(1):63-73.

[22] Lister M L , Homan D C , Hovatta T , et al. MOJAVE. XVII. Jet Kinematics and Parent Population Properties of Relativistically Beamed Radio-loud Blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2019, 874(1).

[23] Valtaoja E , Lindfors E , Saloranta P M , et al. Hydrodynamics of Small-Scale Jets: Observational Aspects[C]// Extragalactic Jets: Theory & Observation from Radio to Gamma Ray. Extragalactic Jets: Theory and Observation from Radio to Gamma Ray, 2008.

[24] Arshakian T G , Chavushyan V H , Ros E , et al. Radio-optical scrutiny of the central engine in compact AGN[J]. Memorie Della Societa Astronomica Italiana, 2004, 76:35.

[25] Chen L , Bai J M . Implications on the blazar sequence and inverse Compton models from Fermi bright blazars[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 735(2):395-402.

[26] Yan D , Zhang L , Zhang S N . Formation of very hard electron and gamma-ray spectra of flat spectrum radio quasar in fast-cooling regime[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 459(3):423-426.

[27] Qin L , Wang J , Yang C , et al. Using the Markov chain Monte Carlo method to study the physical properties of GeV–TeV BL Lac objects[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2018, 70(1).

[28] Abdo A. A., et al. THE FIRST CATALOG OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI DETECTED BY THE\r, *FERMI*\r, LARGE AREA TELESCOPE[J]. The Astrophysical Journal, 2010, 715(1):429-457.

[29] Ackermann M., et al. THE SECOND CATALOG OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI DETECTED BY THE\r, *FERMI*\r, LARGE AREA TELESCOPE[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 743(2):171.

[30] Ackermann M , Ajello M , Atwood W B , et al. THE THIRD CATALOG OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI DETECTED BY THE FERMI LARGE AREA TELESCOPE[J]. The Astrophysical Journal, 2015.

The peak information, the Compton dominance, the spectral index diagram, and the correlations for Fermi blazars

Peng Rui[1], Xie Zhaohua[1], Xue Rui[2], Wang Zerui[2], Luo Dan[1], Huang Hongyan[1], Xu Yunbing[1], Liu Wenguang[1], Yi Tingfeng[1], Tan Can[1], Liu Xiaopeng[1], Du Leiming[1]

(1.School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;
2. School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In this paper, to study the physical properties of blazars, we collect a large sample of Fermi blazars with (quasi) simultaneous data and well fitted spectral energy distribution. We analyze five correlations for the whole sample, the FSRQs only and the BL Lacs only, respectively. Our main results are as follows. (1) We find that there are significant anti-correlations between the synchrotron peak frequency and the synchrotron peak luminosity, the inverse Compton peak frequency and the inverse Compton peak luminosity, the synchrotron peak frequency and the bolometric luminosity for the whole sample, but no correlations for FSRQs and BL Lacs. There are significant anti-correlations between the synchrotron peak frequency and the Compton Dominance for the whole sample and BL Lacs, but no correlation for FSRQs. There are significant anti-correlations between the inverse Compton peak frequency and gamma-ray spectral index for the whole sample, the FSRQs only and the BL Lacs only, respectively. (2) One cannot exclude the possibility that the above correlations for the whole sample are affected by the difference in distribution of FSRQs and BL Lacs in the parametric plane. (3) We suggest that the significant anti-correlation between the synchrotron peak frequency and the Compton Dominance for BL Lacs may provide an evidence for a fast-cooling emission mechanism for BL Lacs. (4) The anti-correlations between the inverse Compton peak frequency and gamma-ray spectral index provide an observational information to the leptonic jet emission model with a log-parabolic shaped electro energy distribution (EED).

Key words: galaxies; active-galaxies; jets-radiation mechanisms; non-thermal